

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Pajić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vladimir Soldo, izv. prof

Student:

Marin Pajić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem dr.sc. Vladimiru Soldi koji je prihvatio mentorstvo te mi ustupio potrebne materijale i stručno me vodio kroz završni rad.

Marin Pajić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin PAJIĆ**

Mat. br.: 0035188286

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rashladni procesi u pivarskoj industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cooling systems in brewery industry**

Opis zadatka:

Za potrebe hlađenja za vrijeme vrenja pive, fermentacije i hlađenja mladog piva potrebno je projektirati rashladnik glikolne smjese učinka hlađenja 750 kW. Temperaturni režim 40 %-tne smjese propilen glikola i vode iznosi -6/-11 °C. Postrojenje se nalazi na području Primorske Hrvatske.

Kondenzator rashladnog agregata hlađen je optočnom vodom.

Rad treba sadržavati:

1. Tehnologiju proizvodnje i hlađenja pive po procesima.
2. Energetsku i sigurnosnu analizu primjene prirodnih radnih tvari kao R717 i R290.
3. Termodinamički proračun komponenti rashladnog agregata.
4. Shemu spajanja i automatske regulacije.
5. Dispozicijski crtež rashladnog agregata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

V Soldo

Dr. sc. Vladimir Soldo, izv. prof

Predsjednik Povjerenstva:

Igor Balen

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1.
1.1. TEHNOLOGIJA PROCESA PROIZVODNJE PIVE	2.
2. RADNE TVARI	4.
2.1. AMONIJAK R717 (NH_3).....	5.
2.2. PROPAN R290 (C_3H_8).....	5.
2.3. USPOREDBA R717 I R290	6.
3. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA	9.
3.1. TERMODINAMIČKI PROCES RADNE TVARI R717	9.
3.2. PRORAČUN KONDENZATORA	13.
3.2.1. Toplina kondenzacije i hlađenja pregrijane pare (desuperheating).....	14.
3.2.2. Odabir dimenzija plašta i cijevi.....	15.
3.2.3. Potrebni parametri na strani vode.....	15.
3.2.4. Potrebni parametri na strani radne tvari R717	18.
3.2.5. Srednje logaritamske temperaturne razlike zone I i zone II.....	19.
3.2.6. Termodinamički proračun zone I	19.
3.2.6.1. Specifična gustoća toplinskog toka R717.....	19.
3.2.6.2. Specifična gustoća toplinskog toka vode.....	20.
3.2.6.3. Grafičko rješenje jednadžbi (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.)	20.
3.2.6.4. Koeficijent prolaza topline i površina kondenzatora zone I	21.
3.2.7. Termodinamički proračun zone II.....	21.
3.2.7.1. Svojstva pregrijane radne tvari R717	22.
3.2.7.2. Koeficijent prijelaza topline radne tvari R717 u zoni II	22.
3.2.7.3. Koeficijent prolaza topline i površina prijelaza topline zone II.....	23.
3.2.8. Pad tlaka na vodenoj strani.....	24.
3.3. PRORAČUN ISPARIVAČA	25.

3.3.1. Karakteristične veličine	25.
3.3.2. Svojstva radnih medija	26.
3.3.2.1. 40%-tna smjesa vode i propilen glikola	26.
3.3.2.2. Amonijak	26.
3.3.3. Odabir dimenzija pločastog isparivača	27.
3.3.4. Prijelaz topline na strani 40%-tne smjese vode i propilen glikola	27.
3.3.5. Prijelaz topline na strani radne tvari R717	28.
3.3.6. Provjera pretpostavke za toplinski tok	30.
3.3.7. Potrebna površina za izmjenu topline	31.
3.4. PRORAČUN DIMENZIJA CJEVOVODA	32.
3.4.1. Tlačni vod	32.
3.4.2. Uisni vod	33.
3.4.3. Kapljevinski vod	33.
4. SPECIFIKACIJE MATERIJALA I OPREME	34.
4.1. KOMPRESOR	34.
4.2. KONDENZATOR HLAĐEN OPTOČNOM VODOM	34.
4.3. ISPARIVAČ	34.
4.4. RASHLADNI TORANJ	34.
4.5. SAKUPLJAČ RADNE TVARI	35.
4.6. FILTAR NEČISTOĆA	35.
4.7. ODVAJAČ ULJA	35.
4.8. ZAPORNI VENTILI	35.
4.9. ELEKTROMAGNETSKI VENTILI	36.
4.10. NEPOVRATNI VENTILI	36.
4.11. PRESOSTAT NISKOG TLAKA	36.
4.12. PRESOSTAT VISOKOG TLAKA	36.
4.13. PRETVARAČ TLAKA	36.
4.14. UPRAVLJAČKI SKLOP	36.
4.15. IZOLACIJA	36.
4.16. CIJEVI	37.
5. ZAKLJUČAK	38.
LITERATURA	39.
PRILOZI	40.

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz toka procesa proizvodnje pive	2.
Slika 2. Blok shema procesa proizvodnje piva	3.
Slika 3. Prikaz rashladnog procesa u T-s dijagramu	6.
Slika 4. Prikaz dobivanja temperature vlažnog termometra u h-x dijagramu	9.
Slika 5. Rashladni proces radne tvari R717	10.
Slika 6. Shema rashladnog sustava	12.
Slika 7. Presjek kondenzatora i ulaz-izlaz radne tvari i vode.....	13.
Slika 8. Dijagram promjene temperature radne tvari i vode u kondenzatoru i rekuperatoru ...	14.
Slika 9. Prikaz točke presjeka jednadžbi (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.)	20.
Slika 10. Kompaktni isparivač	25.

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva R717 i R290 prema procesu na <i>slici 3</i>	7.
Tablica 2. Omjer svojstava R717 i R290	7.
Tablica 3. Granične vrijednosti punjenja radne tvari prema HRN EN 378-1	8.
Tablica 4. Točke rashladnog procesa R717 iz <i>slike 5</i>	10.
Tablica 5. Proračun koeficijenata prijelaza topline radne tvari R717	30.

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

0035188286 – 001	Shema spajanja i automatske regulacije
0035188286 – 002	Dispozicijski crtež rashladnog sustava

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
ϑ_k	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura kondenzacije
ϑ_i	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura isparavanja
ϑ_{w1}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura ulaza vode
ϑ_{w2}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura izlaza vode
ϑ_{wm}	$^{\circ}\text{C}$	Srednja temperatura ulaza i izlaza vode
ϑ_{wmI}	$^{\circ}\text{C}$	Srednja temperatura ulaza i izlaza vode zone I
ϑ_{wmII}	$^{\circ}\text{C}$	Srednja temperatura ulaza i izlaza vode zone II
ϑ_{pot}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura pothlađenja
ϑ_{vr}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura vrenja
ϑ_{ign}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura zapaljenja
ϑ_{maxym}	$^{\circ}\text{C}$	Projektna temperatura hlađenja
ϑ_w^*	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura vlažnog termometra
ϑ_{sup}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura pregrijane pare
ϑ_{w2sup}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura ulaza u rekuperator
ϑ_s	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura sekundara
ϑ_{su}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura ulaza sekundara
ϑ_{si}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura izlaza sekundara
ϑ_z	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura stjenke
$\Delta\vartheta_{tm}$	$^{\circ}\text{C}$	Srednja logaritamska temperaturna razlika
$\Delta\vartheta_{tmI}$	$^{\circ}\text{C}$	Srednja logaritamska temperaturna razlika zone I
$\Delta\vartheta_{tmII}$	$^{\circ}\text{C}$	Srednja logaritamska temperaturna razlika zone II
Φ_o	W	Rashladni učin isparivača
Φ_k	W	Toplinski tok kondenzatora i rekuperatora
Φ_{lat}	W	Toplinski tok kondenzacije
Φ_{sup}	W	Toplinski tok rekuperatora
P_k	W	Snaga kompresora
q_k	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka kondenzatora i rekuperatora
q_{lat}	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka kondenzacije
q_{sup}	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka rekuperatora
q_{eI}	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka zone I (vanjska površina)
q_{eII}	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka zone II (vanjska površina)
q_{iI}	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka zone I (unutarnja površina)

$q_{e.tr}$	W/m^2	Transformirana specifična gustoća toplinskog toka
q_A	W/m^2	Specifična gustoća toplinskog toka isparivača
λ	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost
$\lambda_{\check{c}}$	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost čelika
λ_2	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost vapnenca
λ_{sup}	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost pregrijane pare
λ_{fl}	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost vrele kapljevine
λ_v	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost suhozasićene pare
λ_x	$W/(m \cdot K)$	Toplinska provodnost u ovisnosti o sadržaju pare
k_{eI}	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prolaza topline zone I
k_{eII}	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prolaza topline zone II
k_A	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prolaza topline isparivača
α_w	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline vode
α_{R717}	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline R717
α_{sup}	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline pregrijane pare
α_s	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline sekundara
α_x	$W/(m^2 \cdot K)$	Koeficijent prijelaza topline u ovisnosti o sadržaju pare
α_{fA}	$W/(m^2 \cdot K)$	Srednji koeficijent prijelaza topline isparivača
R_1	$(m^2 \cdot K)/W$	Toplinski otpor kroz stjenku
R_2	$(m^2 \cdot K)/W$	Toplinski otpor kroz vapnenac
ΣR_i	$(m^2 \cdot K)/W$	Suma toplinskih otpora
R_e	$(m^2 \cdot K)/W$	Toplinski otpor na strani radne tvari
c_w	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet vode
c_{sup}	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet pregrijane pare
c_{fl}	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet vrele kapljevine
c_v	$J/(kg \cdot K)$	Specifični toplinski kapacitet suhozasićene pare
q_o	J/kg	Specifični toplinski tok
h_k	J/kg	Latentna toplina kondenzacije
h_1	J/kg	Entalpija R717 točke 1
h_2	J/kg	Entalpija R717 točke 2
h_3	J/kg	Entalpija R717 točke 3
h_4	J/kg	Entalpija R717 točke 4
h_{2s}	J/kg	Entalpija R717 točke 2s
h''	J/kg	Entalpija suhozasićene pare
ν	m^2/s	Kinematska viskoznost
η_w	$Pa \cdot s$	Dinamička viskoznost vode
η_{fl}	$Pa \cdot s$	Dinamička viskoznost vrele kapljevine
η_v	$Pa \cdot s$	Dinamička viskoznost suhozasićene pare
η_x	$Pa \cdot s$	Dinamička viskoznost u ovisnosti o sadržaju pare
η_{sup}	$Pa \cdot s$	Dinamička viskoznost pregrijane pare
w	m/s	Brzina

D	m	Promjer kondenzatora/isparivača
d_e	m	Vanjski promjer cijevi
d_i	m	Unutarnji promjer cijevi
s	m	Razmak cijevi
δ_1	m	Debljina stjenke
δ_2	m	Debljina sloja vapnenca
L	m	Duljina kondenzatora/isparivača
H	m	Visina isparivača
b	m	Debljina orebrene ploče isparivača
d_t	m	Promjer cijevi tlačnog voda
d_u	m	Promjer cijevi usisnog voda
d_{kap}	m	Promjer cijevi kapljevinskog voda
A_e	m^2	Vanjska površina
A_i	m^2	Unutarnja površina
A_{eI}	m^2	Vanjska površina zone I
A_{eII}	m^2	Vanjska površina zone II
A_{UK1}	m^2	Površina odabranog isparivača
A_{UK2}	m^2	Teorijska potrebna površina isparivača
A_t	m^2	Površina presjeka tlačnog voda
A_u	m^2	Površina presjeka usisnog voda
A_{kap}	m^2	Površina presjeka kapljevinskog voda
ρ_w	kg/m^3	Gustoća vode
ρ_1	kg/m^3	Gustoća suhozasićene pare
ρ_v	kg/m^3	Gustoća suhozasićene pare
ρ_{sup}	kg/m^3	Gustoća pregrijane pare
ρ_{fl}	kg/m^3	Gustoća vrele kapljevine
q_{mR717}	kg/s	Maseni protok R717
q_{mw}	kg/s	Maseni protok vode
q_{ms}	kg/s	Maseni protok sekundara
m	kg	Masa sustava
q_{vR717}	m^3/s	Volumenski protok R717
q_{ov}	J/m^3	Volumetrički rashladni učin
Δp	Pa	Pad tlaka
G	$kg/(s \cdot m^2)$	Maseni protok po m^2
n_t	-	Broj cijevi u plaštu
n_{t1}	-	Broj cijevi u prolazu
n_p	-	Broj prolaza u plaštu
B	-	Koeficijent svojstva tvari
N	-	Broj ploča u isparivaču
η_{iz}	-	Izentropski stupanj djelovanja
ε_{hl}	-	Faktor hlađenja

ξ	-	Faktor otpora strujanja
n_t	-	Broj cijevi u plaštu
φ	-	Relativna vlažnost
f_w	-	Faktor broja cijevi u horizontalnom redu
Φ	-	Faktor povećanja površine
Ψ_k	-	Faktor orebrenja cijevi
Re	-	Reynoldsov bezdimenzijski broj
Pr	-	Prandtlov bezdimenzijski broj
Nu	-	Nusseltov bezdimenzijski broj
Bo	-	Boilingov bezdimenzijski broj

SAŽETAK

U ovom radu će se za potrebe hlađenja projektirati rashladnik glikolne smjese učinka hlađenja 750 kW za vrijeme vrenja pive, fermentacije i hlađenja mladog piva. Temperaturni režim 40%-tne smjese propilen glikola i vode iznosit će -6/-11 °C, a postrojenje će se nalaziti na području Primorske Hrvatske. Kondenzator rashladnog agregata je hlađen optočnom vodom. Rad će također sadržavati prikaz tehnologije proizvodnje i hlađenja pive po procesima, kao i energetske i sigurnosne analizu primjene radnih tvari R717 i R290. Za termodinamički proračun komponenti rashladnog sustava bit će odabrana radna tvar R717. Uz rad će biti pridodana i shema spajanja i automatske regulacije, i dispozicijski crtež rashladnog agregata.

Ključne riječi: Rashladni agregat; R717 (amonijak); R290 (propan); kondenzator; isparivač.

SUMMARY

In this paper, for cooling needs, there will be designed chiller for glycol mixture with cooling effect of 750 kW, during the fermentation of beer, fermentation and cooling of the wort. The temperature regime of 40% mixture of propylene glycol and water will be $-6 / -11^{\circ}\text{C}$, and the plant will be located in the area of the Croatian coast. The condenser of the cooling unit is cooled by circulating water. The work will also include a review of the production and cooling of beer per processes, as well as energy and security analysis applications for refrigerants R717 and R290. For thermodynamic calculation of the components of the cooling system will be selected refrigerant R717. In addition to the work will be added connection diagrams and automatic regulation diagrams, and disposition drawing of the cooling unit.

Key words: chiller; R717 (amonia); R290 (propane); condenser; evaporator.

1. UVOD

Postoje više podjela piva, a jedna od njih je prema vrsti kvasca:

Pivo proizvedeno sa čistom kulturom pivskog kvasca vrste "Saccharomyces uvarum" naziva se jednostavno "pivo", "lager pivo", "pivo donjeg vrenja" ili "kontinentalni" tip piva. Ono se dobiva hladnim vrenjem, pri 8–16°C. Nakon završenog vrenja, kvasac se istaloži na dno posude, a mlado pivo prebacuje u tankove za odležavanje, gdje dozrijeva pri 0 do 1 °C, od jedan do deset i više tjedana.

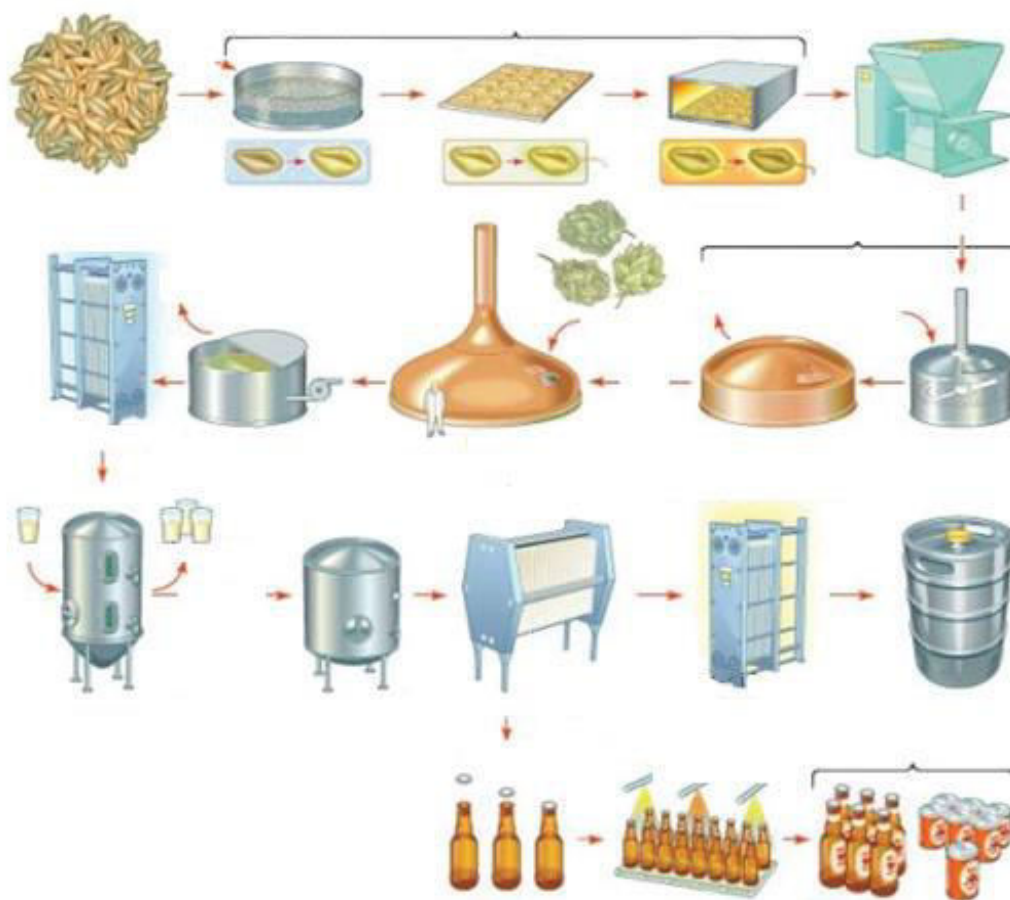
Pivo proizvedeno sa čistom kulturom pivskog kvasca vrste "Saccharomyces cerevisiae" naziva se pivom gornjeg vrenja, a u Engleskoj se upotrebljava naziv "ale". Ono se dobiva toplim vrenjem, do 25°C. nakon završenog vrenja, kvasac ispliva na površinu piva, odakle se uklanja različitim postupcima obiranja.

Afričko pivo se dobiva s posebnom vrstom kvasca ("Schizomyces pombe"), koja u ekstremnim klimatskim uvjetima (30-40°C) može dati proizvod sličan pivu.

Ova podjela je zanimljiva jer kako vidimo iz priloženog ovisno o odabiru pivskog kvasca imat ćemo različite temperature vrenja. U daljnjoj analizi promatrat će se "lager pivo", odnosno "pivo donjeg vrenja".

1.1. Tehnologija procesa proizvodnje pive

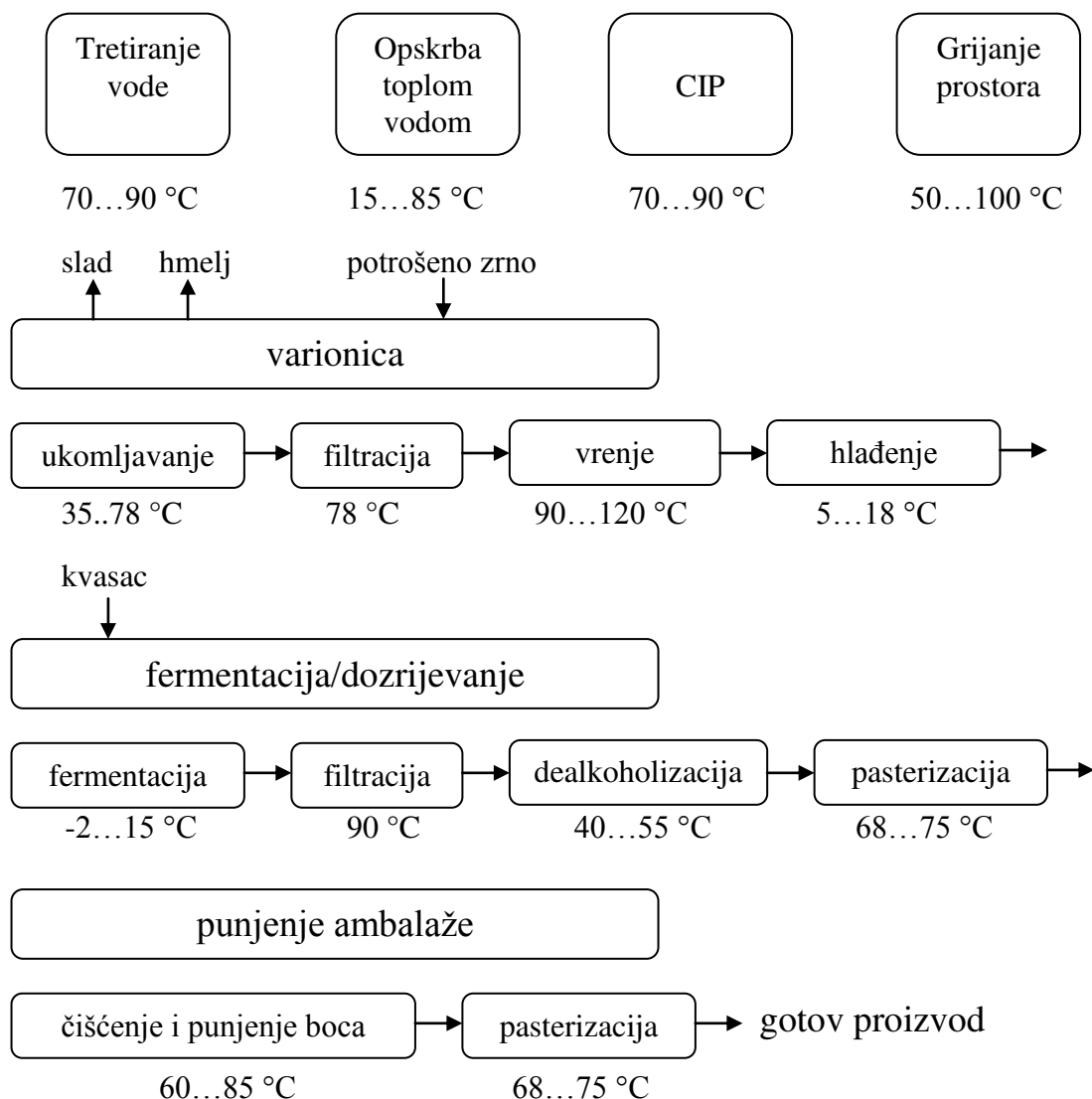
Prikaz procesa proizvodnje pive prikazan je na *slici 1*. Glavne sirovine za proizvodnju piva su ječam, hmelj, pivski kvasac i voda. Na početku procesa natapa se ječam u vodi, gdje nakon što proklija, šalje se na sušenje. Sljedeći korak je mljevenje, a zatim se zajedno s vodom šalje u miješalicu za gnječenje. Zatim se cijedi sladovina koja se zajedno s hmeljem ubacuje u kotao gdje se postiže vrenje. Onda slijedi separacija taloga u vrtložnom separatoru, a ostatak se hladi u izmjenjivaču pa se šalje u spremnik za fermentaciju za nastanak mladog piva i za odvajanje viška kvasca. Nakon sazrijevanja mlade pive slijedi filtracija, dealkoholizacija i pasterizacija i za kraj se puni u ambalažu.



Slika 1. Prikaz toka procesa proizvodnje piva[Ljubica Matijašević; *Održive tehnologije u procesima proizvodnje piva*]

Tijekom proizvodnje pivo prolazi kroz 3 biokemijske i kemijske reakcije; vrenje, fermentacija i dozrijevanje; i 3 separacije; separacija slada, bistrenje slada i bistrenje mladog piva. U procesu se troši velika količina vode, stvara se kruti otpad i oslobađa se ili troši velika količina energije. Ovisno kako gospodarimo s tih 3 stavki, može se jako utjecati na cijenu i vođenje procesa u pivovari.

Na slici 2. može se vidjeti blok shema procesa proizvodnje pive. Iz koje vidimo temperaturne režime procesa i područja gdje je potrebno dovoditi toplinu, a gdje odvoditi. Za rashladni spremnik koji će biti proračunat u nastavku važni su procesi hlađenja sladovine, njegovo održavanje na temperaturi fermentacije, zatim hlađenje i održavanje potrebne temperature za sazrijevanje mlade pive.



Slika 2. Blok shema procesa proizvodnje pive [Ljubica Matijašević; Održive tehnologije u procesima proizvodnje piva]

2. RADNE TVARI

Koristimo ih za prijenos energije s jednog toplinskog spremnika na drugi preko isparivača i kondenzatora.

Uvjeti koje radne tvari moraju ispunjavati su:

- Termodinamičke osobine:
 - niska temperatura isparavanja pri atmosferskom tlaku
 - umjereni tlak zasićenja pri temperaturi 35...45 °C
 - umjereni kompresijski omjer $\frac{p_k}{p_i}$
 - velika latentna toplina isparavanja i kondenzacije
 - velika gustoća pri temperaturi isparavanja
 - visoko položena kritična točka
 - niska temperatura smrzavanja
 - mala viskoznost
- Sigurnosne osobine:
 - nezapaljivost, čista tvar ili u smjesi sa zrakom, uljem i vlagom
 - neotrovnost
 - lagano otkrivanje prisutnosti u zraku
- funkcionalne osobine:
 - nekorozivnost, ne smije otapati materijale konstrukcije
 - ne reagiranje fizikalno ili kemijsko s mazivim uljem, naročito uz prisutnost vlage
 - fizikalna i kemijska stabilnost
- utjecaj na okoliš:
 - bez utjecaja na razgradnju ozona (ODP=0)
 - mali utjecaj na zagrijavanje atmosfere (mali GWP)

Ne postoji idealna radna tvar, ali se nastoji pronaći što bolji kompromis.

2.1. Amonijak R717 (NH₃)

Amonijak je prirodna, anorganska radna tvar koja je gledajući s energetskog i ekološkog stajališta najbolja radna tvar i gotovo je nezamjenjiva u industrijskim postrojenjima. Nezaobilazna je njegova primjena u rashladnim sustavima za brzo hlađenje i skladištenje hrane (tuneli, rashladne komore), u industriji pića, mliječnoj industriji itd. Šire područje njegove primjene bi bilo u industriji u temperaturnom rasponu 0 °C <θ< -45 °C, u industrijskoj klimatizaciji (dizalice topline) u temperaturnom rasponu 20 °C <θ< 0°C i za znanstvena istraživanja na temperaturama 0 °C <θ< -45 °C.

Služi kao zamjena za R22, R502, no nije zamjena za R22 u postojećim sustavima, jer se R22 ubacuje u sustave s bakrenim cijevima koje bi amonijak uništio u slučaju da dođe u kontakt s vlagom.

Amonijak se ne miješa s mazivim uljem što znači da u radu sustava ne dolazi do problema u radu kompresora (njegovog habanja zbog nedostatka ulja), ali je topiv u vodi što predstavlja problem kada voda dospije u sustav.

Potencijal globalnog zagrijavanja (Global warming potential; GWP) mu je jednak 0. Također ne predstavlja problem pri ispuštanju u atmosferu za ozonski omotač jer mu je ODP = 0 (Ozone depletion potential).

2.2. Propan R290 (C₃H₈)

Propan je prirodna organska radna tvar koja se počinje sve više koristiti u rashladnoj tehnici, što je uzrokovano Kyoto protokolom. Šire područje primjene propana je u komercijalnoj klimatizaciji (dizalice topline) u temperaturnom rasponu 20 °C <θ< 0 °C i za znanstvena istraživanja u istom temperaturnom rasponu 20 °C <θ< 0 °C i još dodatno na temperaturama -45 °C <θ.

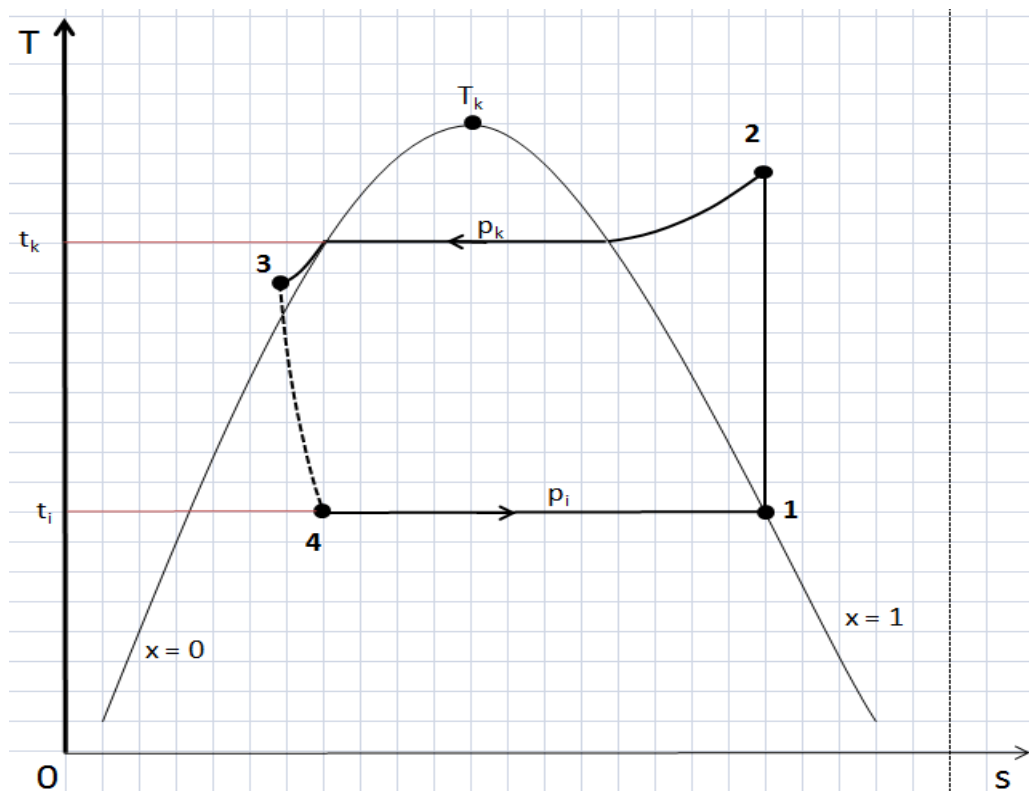
Služi kao zamjena za R22.

Propan čini homogenu smjesu s mazivim uljem što predstavlja problem kod pokretanja sustava zbog habanja kompresora. To se može lagano izbjeći stavljanjem grijača za ulje u kompresor, jer se na dovoljno visokoj temperaturi ulje izdvaja iz propana. Propan nije topiv u vodi pa vlaga u sustavu ne utječe na uništenje materijala sustava.

2.3. Usporedba R717 i R290

Svojstva radnih tvari određuju:

- Protočnu količinu radne tvari
- Veličinu kompresora
- Dimenzije izmjenjivača i cjevovoda
- Masu punjenja sustava



Slika 3. Prikaz rashladnog procesa u T-s dijagramu

U prikazanom rashladnom procesu temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura isparavanja $\vartheta_i = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sa stajališta globalnog zatopljenja i oštećenja ozonskog omotača, jedna i druga radna tvar zadovoljavaju. Također promjena faze se odvija pri konstantnoj temperaturi i tlaku; ne događa pojava klizanje temperature kao što se javlja kod drugih radnih tvari (R407C, R404a...).

Najveću pažnju treba usmjeriti na njihove gustoće, toplinu isparavanja i volumetrički rashladni učin. Volumetrički rashladni učin predstavlja jako važnu karakteristiku svake radne tvari, a on je umnožak gustoće radne tvari na usisu u kompresor i specifičnog rashladnog učina.

$$q_{0V} = \rho_1 q_0 = \rho_1 (h_1 - h_2), \text{ J/m}^3 \quad (2.3.1.)$$

On izravno utječe na kapacitet sustava.

$$\Phi_0 = q_{mRT}q_0 = \rho_1 q_{VRT}q_0 = q_{VRT}q_{OV}, W \quad (2.3.2.)$$

	R717	R290
ODP	0	0
GWP₁₀₀	0	20
Molekularna masa	17,03	44,1
Kritična temperatura T_k, °C	135,25	96,7
Kritični tlak p_k, bar	113,3	42,5
Temperatura vrenja θ_{vr}, °C(p=1bar)	-33,33	-42,4
Klizanje temperature, °C	0	0
Tlak_{vrenja/rošenja}(-15 °C), bar	2,36	2,92
Gustoća kapljevine ρ(35 °C), kg/m³	595,2	484,4
Gustoća pare ρ(-15 °C), kg/m³	1,97	6,5
Toplina isparavanja r, kJ/kg	1312,8	394,4
Volumetrički rashladni učin q_{ov}, kJ/m³	2214,3	1897,4

Tablica 1. Svojstva R717 i R290 prema procesu na slici 3.

Promatrajući omjer volumetričkog rashladnog učina, možemo reći da će za isti kapacitet sustava i isti režim rada, radni volumen kompresora biti manji od R717, nego od R290, unatoč tome što je gustoća na ulazu u kompresor od R717 manja.

Za isto punjenje sustava i isti rashladni učin za R717 bi dobili nekoliko puta manje dimenzije cjevovoda.

	R717/R290
Specifični toplinski kapacitet c_p, kJ/(kgK)	1,33
Toplina isparavanja r, kJ/kg	3,329
Gustoća kapljevine ρ, kg/m³	1,23
Gustoća pare ρ, kg/m³	0,303
Volumetrički rashladni učin q_{ov}, kJ/m³	1,167

Tablica 2. Omjer svojstava R717 i R290

Amonijak spada pod klasu B2L, jer je slabo zapaljiv ($q_v < 10 \text{ cm}^3/\text{s}$) i jako toksičan. Temperatura zapaljenja mu je $\vartheta_{\text{ign}} = 651 \text{ }^\circ\text{C}$, a eksplozivan je kad mu je volumni udio u zraku 15,3...27 %. Otrovan je u smjesi sa zrakom u volumnom udjelu od 0,5...0,6 %.

Propan spada pod klasu A3, jer je jako zapaljiv i slabo toksičan. Temperatura zapaljenja mu je $\vartheta_{\text{ign}} = 470 \text{ }^\circ\text{C}$. Prema ograničenju iz HRN EN 378:

1. Sustavi s $m < 150 \text{ g}$ mogu biti ugrađeni u prostorijama bilo kojeg volumena
2. Sustavi s $m > 150 \text{ g}$ moraju u volumenu prostorije održavati koncentraciju manju od 8 g/m^3 .

Praktična granica punjenja predstavlja punjenje radne tvari u direktne sustave gdje borave ljudi i prikazane su u *tablici 3*.

	Klasa	Praktična granica , g/m^3	Donja granica zapaljenja , kg/m^3
R 717	B2L	0,35	0,116
R290	A3	8	0,038

Tablica 3. Granične vrijednosti punjenja radne tvari prema HRN EN 378-1

Konstruktivski materijali korišteni za izradu sustava za R290 kao radnom tvari su čelik, bakar, morska bronca, mjed, aluminij i dr. Za R717 kao radnu tvar su najčešće korišteni samo ugljični čelik i nehrđajući čelik, jer u dodiru s vlagom R717 je jako agresivan na plemenite metale.

I R290 i R717 imaju svoje prednosti i nedostatke, ali za potrebe daljnjeg proračuna je odabrana radna tvar R717 samo zbog boljih termodinamičkih svojstava.

3. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA

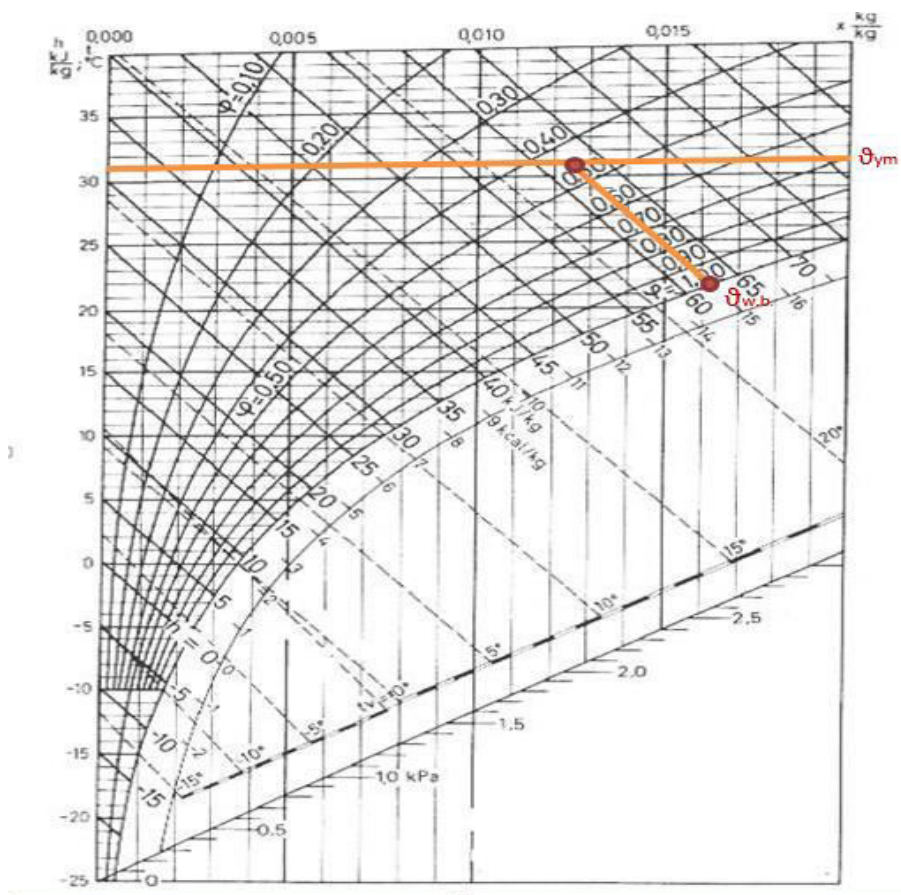
3.1. Termodinamički proces radne tvari R717

Za odabir temperatura isparavanja i kondenzacije radne tvari potrebno je odrediti temperature toplinskih ponora i izvora.

Toplina s kondenzatora će se odvoditi pomoću optočne vode i rashladnog tornja na vanjski okoliš. Rashladni agregat se nalazi na području grada Pule, čiji podaci se nalaze u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi; prilog E*. Temperatura za projektiranje hlađenja je $\vartheta_{\max \text{ ym}} = 31^\circ\text{C}$, a relativna vlažnost $\phi_{\max} \approx 43\%$. Za projektnu temperaturu i relativnu vlažnost dobiva se pripadajuća temperatura vlažnog termometra $\vartheta_w^* = 21,8^\circ\text{C}$, pomoću koje određujemo temperaturu vode na ulazu u kondenzatora.

$$\vartheta_{w1} = \vartheta_w^* + (4 \div 6), ^\circ\text{C} \quad (3.1.1)$$

$$\vartheta_{w1} = 21,8 + 4,2 = 26^\circ\text{C}$$



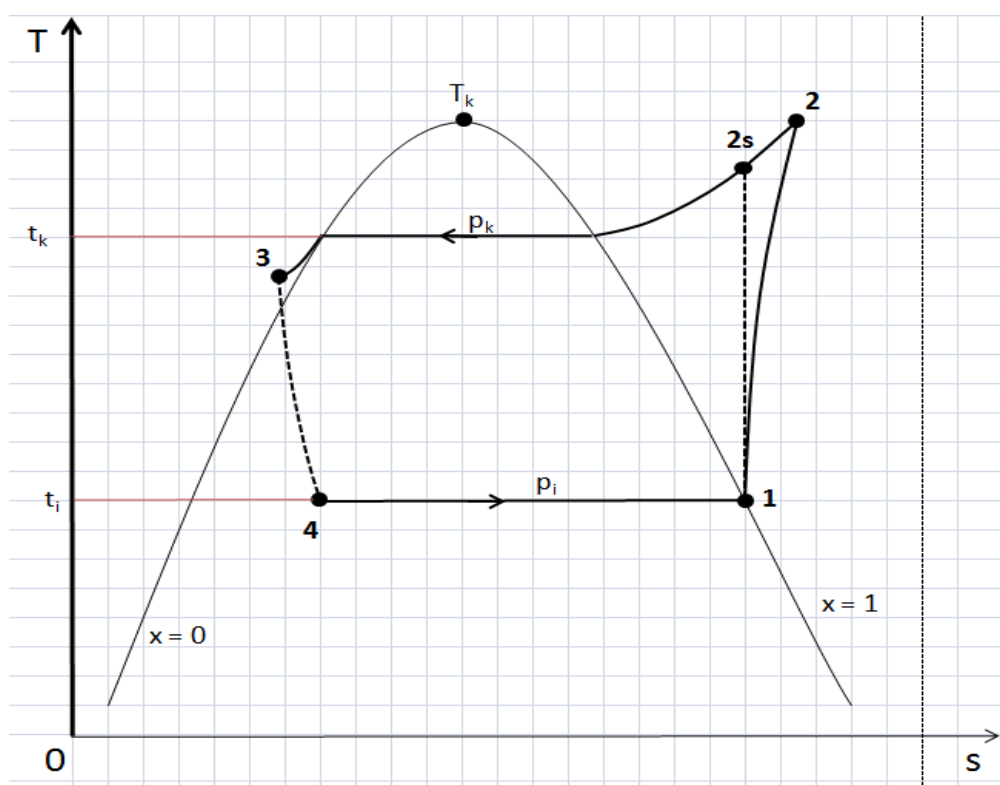
Slika 4. Prikaz dobivanja temperature vlažnog termometra u h-x dijagramu

Temperatura vode na izlazu iz kondenzatora će biti $\vartheta_{w2} = 31\text{ °C}$. Temperatura kondenzacije je odabrana $\vartheta_k = 35\text{ °C}$, s temperaturom pothlađenja od $\Delta\vartheta_{\text{pot}} = 2\text{ °C}$.

Isparivač je namijenjen za hlađenje 40%-tne smjese propilen glikola u temperaturnom režimu -6/-11 °C pa je odabrana temperatura isparavanja $\vartheta_i = -15\text{ °C}$.

	$\vartheta\text{ (°C)}$	$p\text{ (bar)}$	$h\text{ (kJ/kg)}$
1	-15	2,364	1363,14
2s	113,9	13,525	1621,39
3	33	13,525	278,99
4	-15	2,364	278,99

Tablica 4. Točke rashladnog procesa R717 iz slike 5.



Slika5. Rashladni proces R717

Uzima se u obzir izentropski stupanj djelovanja, jer kompresor u realnom procesu ne vrši kompresiju pri konstantnoj entropiji. Izentropski stupanj djelovanja je $\eta_{iz} = 0,85$.

$$\eta_{iz} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.1.2.)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{iz}} = 1363,14 + \frac{1621,39 - 1363,14}{0,85} = 1666,96 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura točke 2 je izvađena iz toplinskih tablica. Pri entalpiji h_2 i tlaku p_k , u pregrijanom području radna tvar ima temperaturu:

$$\vartheta_2 = 131.32 \text{ }^\circ\text{C}$$

U zadatku je zadan rashladni učin $\Phi_0 = 750 \text{ kW}$ iz kojeg dobivamo protočnu masu R717.

$$q_{mR717} = \frac{\Phi_0}{h_1 - h_4}, \text{ kg/s} \quad (3.1.3)$$

$$q_{mR717} = \frac{750000}{1363,14 - 278,99} = 0,692 \text{ kg/s}$$

Uz poznati maseni protok q_{mR717} do snage kompresora dolazimo iz jednadžbe (6.).

$$P_k = q_{mR717}(h_2 - h_1), \text{ W} \quad (3.1.4)$$

$$P_k = 0,692 (1666,96 - 1363,14) = 210,25 \text{ kW}$$

Postavljanjem toplinske bilance procesa uz zanemarenu snagu ekspanzije dobivamo toplinski učin kondenzatora Φ_{23} .

$$\Phi_k - \Phi_0 = P_k, \text{ W} \quad (3.1.5.)$$

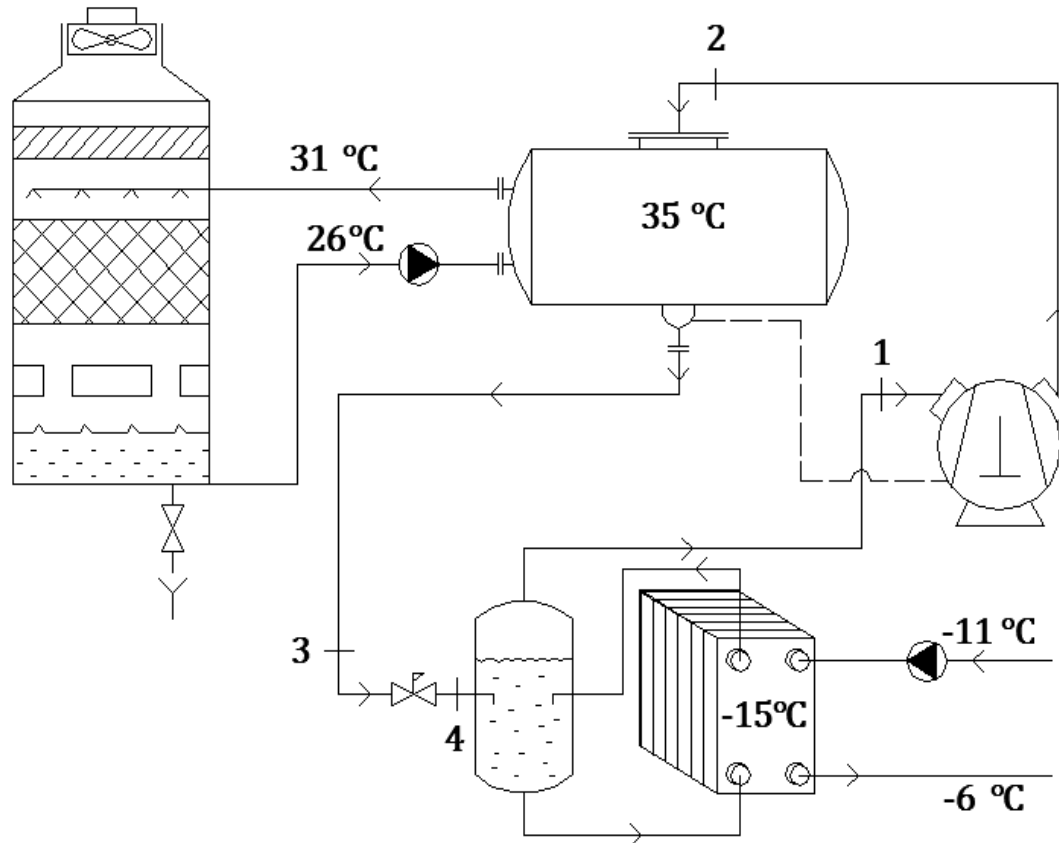
$$\Phi_k = \Phi_0 + P_k = 750 + 210,25 = 960,25 \text{ kW}$$

Kako su poznati rashladni učin Φ_0 i snaga kompresora P_k možemo dobiti faktor hlađenja ε_{hl} koji nam pokazuje omjer dobivenog rashladnog učina na utrošenu energiju.

$$\varepsilon_{hl} = \frac{\Phi_0}{P_k} \quad (3.1.6.)$$

$$\varepsilon_{hl} = \frac{750}{210,25} = 3,567$$

Na slici 6. je prikazana jednostavna shema rashladnog procesa.

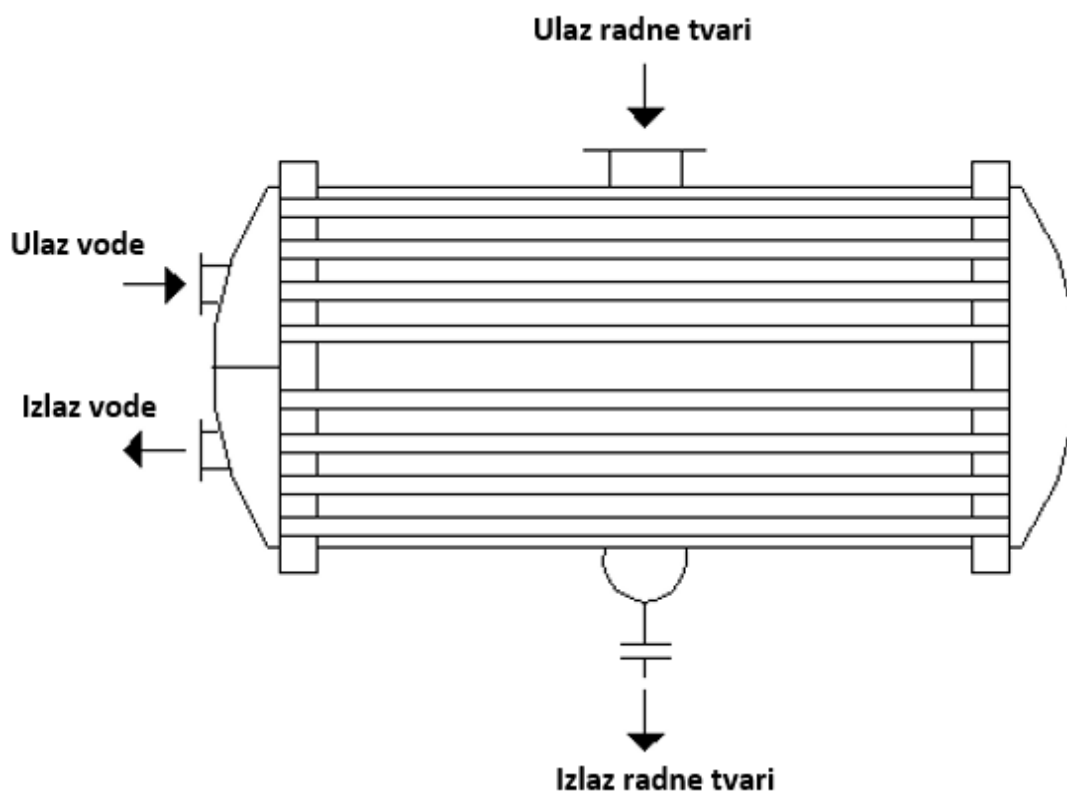


Slika 6. Shema rashladnog sustava

3.2. Proračun kondenzatora

Odabran je "shell and tube" kondenzator s rekuperatorom pregrijanih para ("desuperheaterom"), hlađen optočnom vodom. R717 se nalazi oko cijevi, a optočna voda se nalazi u cijevima kondenzatora i cirkulacijskom pumpom se dovodi do rashladnog tornja gdje ishlapljivanjem prenosi svoju toplinu na okolišni zrak.

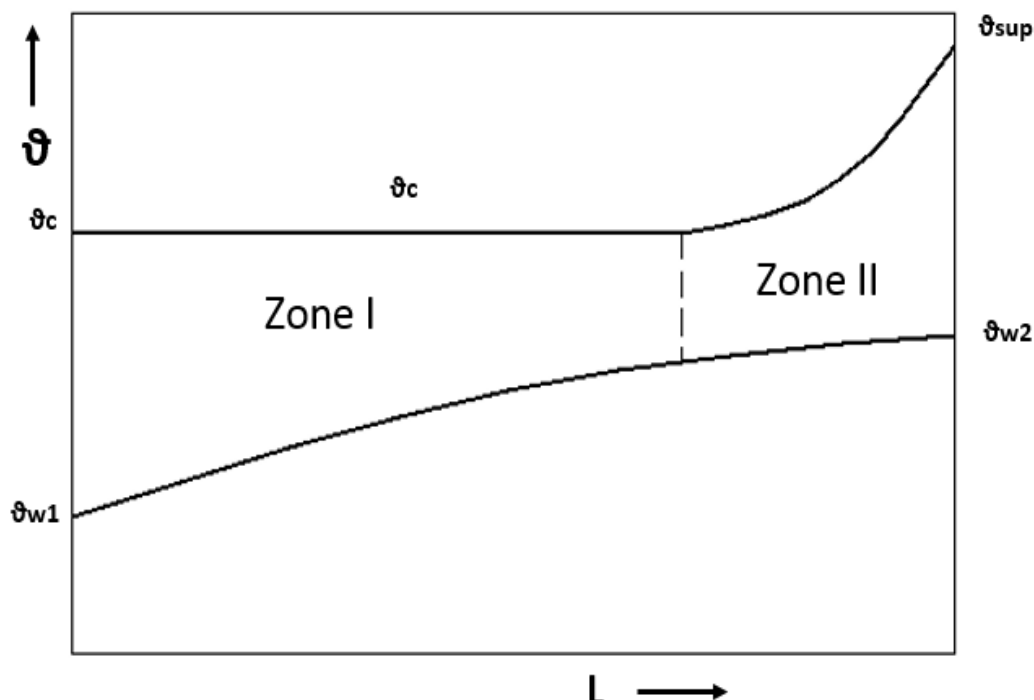
Proračunom ćemo dobiti koeficijente prolaza topline k_{e1} i k_{e2} , dimenzije kondenzatora i rekuperatora i pad tlaka sekundara (vode).



Slika 7. Presjek kondenzatora i ulaz-izlaz radne tvari i vode

Zadano:

- Toplinski tok $\Phi_k = 960,25 \text{ kW}$
- Maseni protok R717 $q_{mR717} = 0,692 \text{ kg/s}$
- Temperatura vode na ulazu $\vartheta_{w1} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura vode na izlazu $\vartheta_{w2} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura pregrijane pare R717 $\vartheta_{\text{sup}} = 131,32 \text{ }^\circ\text{C}$



Slika 8. Dijagram promjene temperature radne tvari i vode u kondenzatoru i rekuperatoru

3.2.1. Toplina kondenzacije i hlađenja pregrijane pare (desuperheating)

Specifični toplinski tok kondenzatora:

$$q_k = q_{lat} + q_{sup}, \text{ W/m}^2 \quad (3.2.1.1.)$$

Specifični toplinski tok kondenzacije:

$$q_{lat} = \Delta h_{32II}, \text{ J/kg} \quad (3.2.1.2.)$$

$$q_{lat} = 1108,65 \text{ kJ/kg}$$

Specifični toplinski tok rekuperatora:

- Specifični toplinski kapacitet pregrijanih para ($\vartheta_{sup} = 83,16^\circ\text{C}$)

$$c_{sup} = 2,881 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$q_{sup} = c_{sup} (\vartheta_{sup} - \vartheta_k), \text{ J/kg} \quad (3.2.1.3.)$$

$$q_{sup} = 2,881 (131,32 - 35) = 277,48 \text{ kJ/kg}$$

Toplinski tok rekuperatora:

$$\Phi_{sup} = q_{sup} \cdot q_{mR717}, \text{ W} \quad (3.2.1.4.)$$

$$\Phi_{\text{sup}} = 277,48 \cdot 0,692 = 192 \text{ kW}$$

Toplinski tok kondenzacije:

$$\Phi_{\text{lat}} = \Phi_k - \Phi_{\text{sup}}, \text{ W} \quad (3.2.1.5.)$$

$$\Phi_{\text{lat}} = 960,25 - 192 = 768,25 \text{ kW}$$

3.2.2. Odabir dimenzija plašta i cijevi

- Promjer plašta $D = 800 \text{ mm}$
- Vanjski promjer cijevi $d_e = 25 \text{ mm}$
- Unutarnji promjer cijevi $d_i = 20 \text{ mm}$
- Razmak cijevi $s = 35 \text{ mm}$
- Omjer unutarnje i vanjske površine $\frac{A_e}{A_i} = 1,25$

Približan broj cijevi koji se može postaviti u presjek plašta kondenzatora:

$$n_t = 0,75 \left[\left(\frac{D}{s} \right)^2 - 1 \right] + 1 \quad (3.2.2.1.)$$

$$n_t = 0,75 \left[\left(\frac{0,8}{0,035} \right)^2 - 1 \right] + 1 = 392,08$$

Odabran broj cijevi u presjeku plašta $n_t = 392$.

3.2.3. Potrebni parametri na strani vode

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta \vartheta_m = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{w1}) - (\vartheta_k - \vartheta_{w2})}{\ln \frac{\vartheta_k - \vartheta_{w1}}{\vartheta_k - \vartheta_{w2}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.3.1.)$$

$$\Delta \vartheta_m = \frac{(35 - 26) - (35 - 31)}{\ln \frac{35 - 26}{35 - 31}} = 6,166 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{wm} = \vartheta_k - \Delta \vartheta_m, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.3.2.)$$

$$\vartheta_{wm} = 35 - 6,166 = 28,834 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Termodinamička svojstva vode za $\vartheta_{wm} = 28,834\text{ }^{\circ}\text{C}$:

- Gustoća $\rho_w = 996\text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_w = 4,175\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- Toplinska provodnost $\lambda_w = 0,6102\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_w = 8,251 \cdot 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Kinematska viskoznost $\nu_w = 8,284 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$
- Prandtlov bezdimenzijski broj $Pr = 5,634$

Maseni protok vode:

$$\dot{q}_{mw} = \frac{\Phi_k}{c_w(\vartheta_{w2} - \vartheta_{w1})}, \text{ kg/s} \quad (3.2.3.3.)$$

$$\dot{q}_{mw} = \frac{960250}{4175(31-26)} = 46\text{ kg/s}$$

Broj prolaza za vodu:

Preporučeno: $n_p = 2 \div 8$

$$n_p = 4$$

Broj cijevi u jednom prolazu:

$$n_{t1} = n_t / n_p = 392 / 4 = 98$$

Brzina vode u cijevima:

$$w = \frac{\dot{q}_{mw}}{\frac{\pi d_i^2}{4} n_{t1} \rho_w}, \text{ m/s} \quad (3.2.3.4.)$$

$$w = \frac{46}{\frac{\pi 0,02^2}{4} \cdot 98 \cdot 996} = 1,5\text{ m/s}$$

Preporučena brzina vode u cijevima $w = (1 \div 2,5)\text{ m/s}$.

Koeficijent prijelaza topline na strani vode u cijevima se dobiva Mac Adamsovim proračunom [Risto Ciconkov, *Refrigeration solved examples*].

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (3.2.3.5.)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu = \frac{\alpha_w \cdot d_i}{\lambda} \quad (3.2.3.6.)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re = \frac{w \cdot d_i}{\nu} \quad (3.2.3.7.)$$

Prandtllov bezdimenzijski broj:

$$Pr = \frac{\eta_w \cdot c_w}{\lambda_w} \quad (3.2.3.8.)$$

Iz jednačbi (3.2.3.5.), (3.2.3.6.), (3.2.3.7.) i (3.2.3.8.) dobivena je pojednostavljena jednačba za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_w = B_w \frac{w^{0,8}}{d_i^{0,2}}, W/(m^2 \cdot K) \quad (3.2.3.9.)$$

gdje B_w sadrži termodinamička svojstva vode.

$$B_w = 0,023 \cdot \rho_w^{0,8} \cdot c_w^{0,4} \cdot \lambda_w^{0,6} \cdot \eta_w^{-0,4} \quad (3.2.3.10)$$

Konačna jednačba za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_w = f_w \cdot B_w \cdot \frac{w^{0,8}}{d_i^{0,2}}, W/(m^2 \cdot K) \quad (3.2.3.11.)$$

f_w je korekcijski faktor ovisan o Reynoldsovom broju.

$f_w = 1$ za $Re \geq 10000$ (turbulentno strujanje)

Ako je $2300 < Re < 10000$, korekcijski faktor je $f_w < 1$, i računa se preko:

$$f_w = -0,010183 \left(\frac{Re}{1000}\right)^2 + 0,18978 \left(\frac{Re}{1000}\right) + 0,106247 \quad (3.2.3.12.)$$

Ako je $Re < 2300$, onda imamo laminarno strujanje koje se ne preporuča za ovaj tip izmjenjivača.

Koeficijent B_w :

$$B_w = 0,023 \cdot 996^{0,8} \cdot 4175^{0,4} \cdot 0,6102^{0,6} \cdot \left(\frac{8,251}{10^4}\right)^{-0,4}$$

$$B_w = 2057,21$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re = \frac{1,5 \cdot 0,02}{8,284 \cdot 10^{-7}} = 36234,8$$

Kako je $Re > 10000 \rightarrow f_w = 1$.

Koeficijent prijelaza topline u cijevima na strani vode:

$$\alpha_w = 1 \cdot 2057,21 \cdot \frac{1,5^{0,8}}{0,02^{0,2}} = 6224,5 W/(m^2 \cdot K)$$

Toplinski otpor na strani vode:

- Toplinski otpor kroz čeličnu stjenku cijevi

$$R_1 = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right) \left(\frac{d_i}{d_m}\right), (m^2 \cdot K)/W \quad (3.2.3.13.)$$

$$R_1 = \left(\frac{0,0025}{50} \right) \left(\frac{20}{22,5} \right) = 0,0000444 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

- Toplinski otpor zbog sloja vapnenca debljine 0,4 mm

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W} \quad (3.2.3.14.)$$

$$R_2 = \frac{0,0004}{2} = 0,0002 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Ukupni toplinski otpor na strani vode:

$$\Sigma R_i = R_1 + R_2, (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W} \quad (3.2.3.15.)$$

$$\Sigma R_i = 0,0000444 + 0,0002 = 0,0002444 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

3.2.4. Potrebni parametri na strani radne tvari R717

Svojstva R717 na temperaturi kondenzacije $\vartheta_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$:

- Gustoća $\rho = 587,1 \text{ kg/m}^3$
- Toplina isparavanja $h_k = 1108,926 \text{ kJ/kg}$
- Toplinska provodnost $\lambda = 0,498 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

U koeficijentu B su sadržana sva termodinamička svojstva R717 pri temperaturi $\vartheta_k = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ za stanje vrele kapljevine:

- Gravitacijsko ubrzanje $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Broj cijevi u vertikalnom stupcu $f = 12$
- Koeficijent za obične cijevi $\Psi_k = 1$

$$B = \left(\frac{g \cdot h_c \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta} \right)^{0,25} \quad (3.2.4.1.)$$

$$B = \left(\frac{9,81 \cdot 1108926 \cdot 587,1^2 \cdot 0,498^3}{1,33 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,25} = 7681,7$$

f se može približno izračunati preko jednadžbe:

$$f = \frac{0,9D}{1,732s} \quad (3.2.4.2.)$$

$$f = \frac{0,9 \cdot 0,8}{1,732 \cdot 0,035} = 11,88 \rightarrow f = 12$$

3.2.5. Srednje logaritamske temperaturne razlike zone I i zone II

Proračun je baziran na srednjim logaritamskim temperaturnim razlikama, koje su različite po zonama.

Izlazna temperatura vode zone I (ulazna temperatura vode zone II):

$$\vartheta_{w2sup} = \vartheta_{w2} - \frac{\Phi_k}{c_w \cdot q_{mw}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.5.1.)$$

$$\vartheta_{w2sup} = 31 - \frac{192000}{4175 \cdot 46} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika zone I:

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{w1}) - (\vartheta_k - \vartheta_{w2sup})}{\ln \frac{\vartheta_k - \vartheta_{w1}}{\vartheta_k - \vartheta_{w2sup}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.5.2.)$$

$$\Delta\vartheta_{mI} = \frac{(35 - 26) - (35 - 30)}{\ln \frac{35 - 26}{35 - 30}} = 6,805$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika zone II:

$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(\vartheta_{sup} - \vartheta_{w2}) - (\vartheta_k - \vartheta_{w2sup})}{\ln \frac{\vartheta_{sup} - \vartheta_{w2}}{\vartheta_k - \vartheta_{w2sup}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.5.3.)$$

$$\Delta\vartheta_{mII} = \frac{(131,32 - 31) - (35 - 30)}{\ln \frac{131,32 - 31}{35 - 30}} = 31,785 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.2.6. Termodinamički proračun zone I

3.2.6.1. Specifična gustoća toplinskog toka R717

Nusseltov koeficijent prijelaza topline unutar plašta (kondenzacija radne tvari):

$$\alpha_{R717} = 0,725 \cdot \left(\frac{g \cdot h_k \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\eta \cdot d_e (\vartheta_k - \vartheta_z)} \right)^{0,25} \cdot f^{-\frac{1}{6}} \cdot \Psi_k, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.2.6.1.1.)$$

Kada uvrstimo jednadžbu (3.2.4.1.) u jednadžbu (3.2.6.1.1.) dobije se pojednostavljeni izraz za koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{R717} = 0,725 \cdot B \cdot d_e^{-0,25} \cdot f^{-\frac{1}{6}} \cdot \Psi_k \cdot (\vartheta_k - \vartheta_z)^{-0,25}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.2.6.1.2.)$$

$$\alpha_{R717} = 0,725 \cdot 7681,7 \cdot 0,025^{-0,25} \cdot 12^{-\frac{1}{6}} \cdot 1 \cdot (35 - \vartheta_z)^{-0,25}$$

$$\alpha_{R717} = 9256,51(35 - \vartheta_z)^{-0,25}$$

Toplinski otpor na strani radne tvari:

$$R_e = 0, \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W} \quad (3.2.6.1.3.)$$

Gustoća specifičnog toplinskog toka na strani radne tvari R717:

$$q_{el} = \alpha_{R717}(35 - \vartheta_z), \text{ W/m}^2 \quad (3.2.6.1.4.)$$

Uvrsti se rješenje jednadžbe (3.2.6.2.) u (3.2.6.4.):

$$q_{el} = 9256,51(35 - \vartheta_z)^{0,75}, \text{ W/m}^2$$

Temperatura ϑ_z je temperatura stjenke.

3.2.6.2. Specifična gustoća toplinskog toka vode

Srednja temperatura vode zone I:

$$\vartheta_{wmI} = \vartheta_k - \Delta\vartheta_{mI}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2.6.2.1.)$$

$$\vartheta_{wmI} = 35 - 6,805 = 28,195 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Gustoća specifičnog toplinskog toka na strani vode:

$$q_{il} = \frac{\vartheta_z - \vartheta_{wmI}}{\frac{1}{\alpha_w} + \Sigma R_i}, \text{ W/m}^2 \quad (3.2.6.2.2.)$$

$$q_{il} = \frac{\vartheta_z - 28,195}{\frac{1}{6224,5} + 0,0002444} = 2468,52 (\vartheta_z - 28,195)$$

Temperatura ϑ_z je temperatura stjenke.

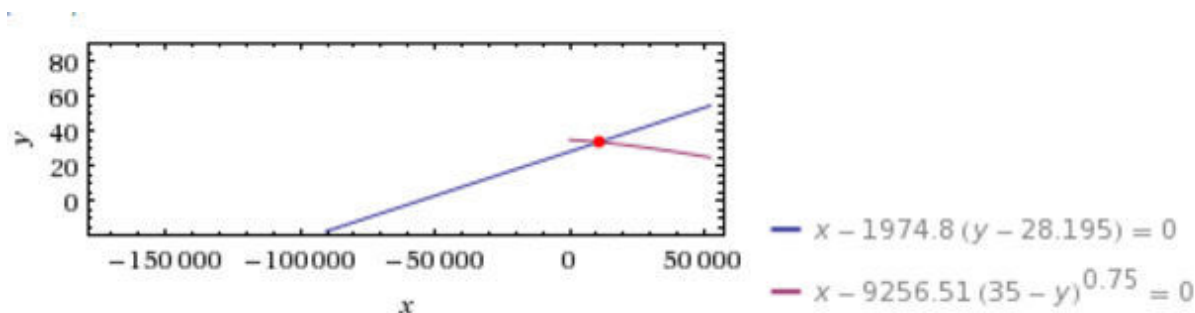
Gustoća specifičnog toplinskog toka vode izražena preko vanjske površine:

$$q_{el} = q_{il} \frac{A_i}{A_e}, \text{ W/m}^2 \quad (3.2.6.2.3.)$$

$$q_{el} = \frac{1}{1,25} \cdot 2468,52 (\vartheta_z - 28,195) = 1974,8 (\vartheta_z - 28,195)$$

3.2.6.3. Grafičko rješenje jednadžbi (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.)

Rješene jednadžbe (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.) daju sustav jednadžbi s dvije nepoznanice koje se mogu riješiti numerički ili grafički kako je prikazano na slici 7.



Slika 8. Prikaz točke presjeka jednadžbi (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.)

Točka presjeka daje rješenje jednačbi (3.2.6.2.3.) i (3.2.6.1.4.):

$$q_{el} = 10964 \text{ W/m}^2$$

$$\vartheta_z = 34,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.2.6.4. Koeficijent prolaza topline i površina kondenzatora zone I

Rješavanjem jednačbe (3.2.6.1.2.) se dobije koeficijent prijelaza topline radne tvari R717 u zoni I:

$$\alpha_{R717} = 9256,5(35 - \vartheta_z)^{-0,25}$$

$$\alpha_{R717} = 9256,5(35 - 34,75)^{-0,25}$$

$$\alpha_{R717} = 8754,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Koeficijent prolaza topline zone I:

$$k_{el} = \frac{q_{el}}{\Delta\vartheta_{mI}}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.2.6.4.1.)$$

$$k_{el} = \frac{10964}{6,805} = 1612,1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Provjera koeficijenta prolaza topline zone I:

$$k_{el} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{R717}} + R_e + \left(\sum R_i + \frac{1}{\alpha_w}\right) \cdot \frac{A_e}{A_i}}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.2.6.4.2.)$$

$$k_{el} = \frac{1}{\frac{1}{8754,3} + 0 + \left(0,0002444 + \frac{1}{6224,5}\right) \cdot 1,25} = 1612,1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Potrebna površina prijelaza topline zone I:

$$A_{el} = \frac{\Phi_{lat}}{q_{el}}, \text{ m}^2 \quad (3.2.6.4.3.)$$

$$A_{el} = \frac{768250}{10964} = 70,03 \text{ m}^2$$

3.2.7. Termodinamički proračun zone II

Koeficijent prijelaza topline u zoni II ovisi o brzini pare radne tvari R717 koja struji preko cijevi. Do te brzine dolazimo iteracijom proračuna zone II, jer nemamo potrebne parametre rasporeda i dimenzija cijevi koje su potrebne za izračun brzine pare radne tvari R717.

Pretpostavka transformirane specifične gustoće toplinskog toka koja se odnosi na cijelo područje kondenzacije:

$$q_{e.tr} = 7030 \text{ W/m}^2$$

Ukupna vanjska površina prijelaza topline:

$$A_e = \frac{\Phi_k}{q_{e.tr}}, \text{ m}^2 \quad (3.2.7.1.)$$

$$A_e = \frac{960250}{7030} = 136,59 \text{ m}^2$$

Ukupna unutarnja površina prijelaza topline:

$$A_i = \frac{A_e}{\frac{A_e}{A_i}}, \text{ m}^2 \quad (3.2.7.2.)$$

$$A_i = \frac{136,59}{1,25} = 109,27 \text{ m}^2$$

Aktivna duljina cijevi:

$$L = \frac{A_i}{\pi \cdot d_i \cdot n_t}, \text{ m} \quad (3.2.7.3.)$$

$$L = \frac{109,27}{\pi \cdot 0,02 \cdot 392} = 4,439 \text{ m}$$

w_{sup} je brzina radne tvari R717 između cijevi. Broj cijevi u horizontalnim redovima je različit kroz poprečni presjek. Ekvivalentni broj cijevi u jednom horizontalnom redu ovisi o rasporedu cijevi u plaštu. U gornjem dijelu kondenzatora je broj cijevi u redu manji, stoga:

$$n_{eqv} \approx 0,3 \cdot n_t^{0,5} \quad (3.2.7.4.)$$

$$n_{eqv} = 0,3 \cdot 392^{0,5} = 5,94$$

Zajednički poprečni presjek između cijevi:

$$A_s = n_{eqv}(s_1 - d_e)L, \text{ m}^2 \quad (3.2.7.5.)$$

$$A_s = 5,94(0,035 - 0,025)4,439 = 0,2636 \text{ m}^2$$

3.2.7.1. Svojstva pregrijane pare radne tvari R717 na temperaturi $\vartheta_{sup} = 131,32 \text{ }^\circ\text{C}$:

- Gustoća $\rho_{sup} = 7,299 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet $c_{sup} = 2,516 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- Toplinska provodnost $\lambda_{sup} = 0,03834 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_{sup} = 13,84 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

3.2.7.2. Koeficijent prijelaza topline radne tvari R717 u zoni II

Volumenski protok radne tvari R717:

$$q_{vR717} = \frac{q_{mR717}}{\rho_{sup}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.2.7.2.1.)$$

$$q_{vR717} = \frac{0,692}{7,299} = 0,0948 \text{ m}^3/\text{s}$$

Brzina radne tvari R717 između cijevi:

$$w_{sup} = \frac{q_{vR717}}{A_s}, \text{ m/s} \quad (3.2.7.2.2.)$$

$$w_{sup} = \frac{0,0948}{0,2636} = 0,3596 \text{ m/s}$$

Koeficijent prijenosa topline radne tvari R717:

Za $100 < Re < 1000$:

$$Nu = 0,71 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \quad (3.2.7.2.3.)$$

Za $1000 < Re < 2 \cdot 10^6$:

$$Nu = 0,40 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \quad (3.2.7.2.4.)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re = \frac{w_{sup} \cdot d_i \cdot \rho_{sup}}{\eta_{sup}} \quad (3.2.7.2.5.)$$

$$Re = \frac{0,3596 \cdot 0,02 \cdot 7,299}{13,84 \cdot 10^{-6}} = 4741$$

Prandtllov bezdimenzijski broj:

$$Pr = \frac{\eta_{sup} \cdot c_{sup}}{\lambda_{sup}} \quad (3.2.7.2.6.)$$

$$Pr = \frac{13,84 \cdot 10^{-6} \cdot 2516}{0,03834} = 0,9082$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu = 0,40 \cdot 4741^{0,6} \cdot 0,9082^{0,36} = 62,02$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_{sup} = \frac{Nu \cdot \lambda_{sup}}{d_e}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.2.7.2.7.)$$

$$\alpha_{sup} = \frac{62,02 \cdot 0,03834}{0,025} = 95,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.2.7.3. Koeficijent prolaza topline i površina prijelaza topline zone II

Koeficijent prolaza topline zone II:

$$k_{el} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sup}} + R_e + \left(\Sigma R_i + \frac{1}{\alpha_w} \right) \frac{A_e}{A_i}}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.2.7.3.1.)$$

$$k_{el} = \frac{1}{\frac{1}{95,11} + 0 + \left(0,0002444 + \frac{1}{6224,5} \right) \cdot 1,25} = 90,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Specifični toplinski tok zone II:

$$q_{eII} = k_{eII} \cdot \Delta\vartheta_{mII}, \text{ W/m}^2 \quad (3.2.7.3.2.)$$

$$q_{eII} = 90,74 \cdot 31,784 = 2884,2 \text{ W/m}^2$$

Potrebna površina prijenosa topline zone II:

$$A_{eII} = \frac{\Phi_k}{q_{eII}}, \text{ m}^2 \quad (3.2.7.3.3.)$$

$$A_{eII} = \frac{960250}{2884,2} = 66,57 \text{ m}^2$$

Ukupna površina prijenosa topline kondenzatora:

$$A_e = A_{eI} + A_{eII}, \text{ m}^2 \quad (3.2.7.3.4.)$$

$$A_e = 70,03 + 66,57 = 136,6 \text{ m}^2$$

Transformirana specifična gustoća toplinskog toka:

$$q_{e.tr} = \frac{\Phi_k}{A_e}, \text{ W/m}^2 \quad (3.2.7.3.5.)$$

$$q_{e.tr} = \frac{960250}{136,6} = 7029,65 \text{ W/m}^2$$

što je približno jednako pretpostavljenoj vrijednosti (7030 W/m^2).

3.2.8. Pad tlaka na vodenoj strani

$$\Delta p = \left(\xi \frac{L}{d_i} + \xi_{in} + 1 + \frac{\xi_{in} + 1}{n_p} \right) n_p \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \text{ Pa} \quad (3.2.8.1.)$$

ξ je faktor linijskog otpora cijevi:

$$\xi = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (3.2.8.2.)$$

$$\xi = \frac{0,3164}{36234,8^{0,25}} = 0,02293$$

ξ_{in} je faktor lokalnih hidrauličkih otpora, u ovom slučaju ulaza vode u cijev:

$$\xi_{in} \approx 0,5$$

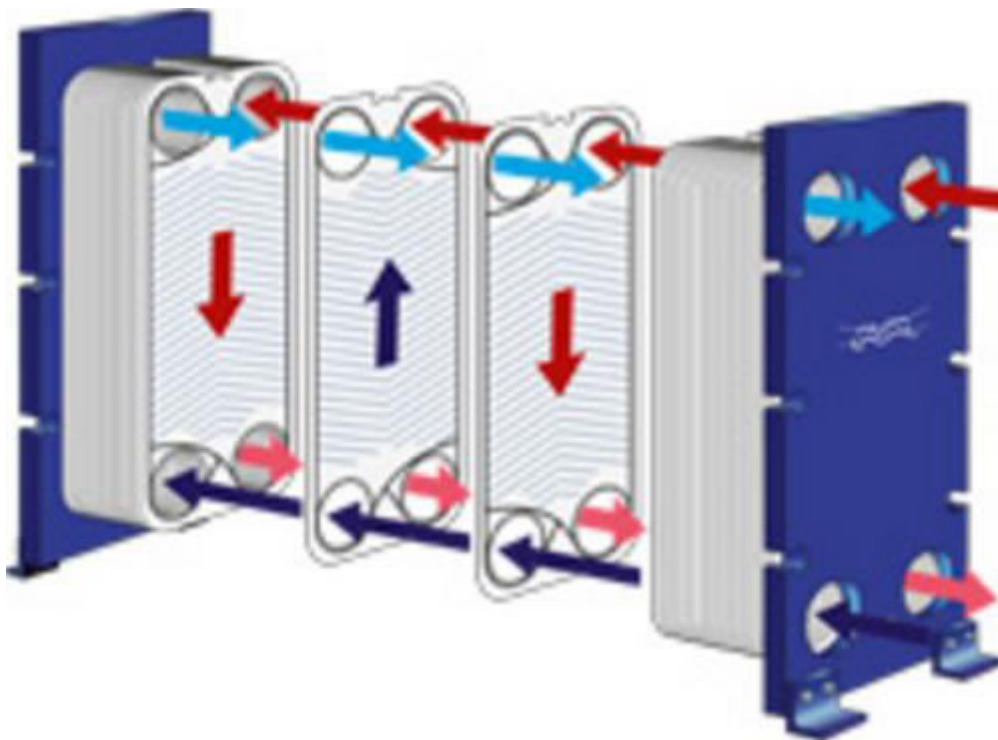
Onda je pad tlaka na vodenoj strani jednak:

$$\Delta p = \left(0,02293 \frac{4,439}{0,02} + 0,5 + 1 + \frac{0,5 + 1}{4} \right) 4 \cdot \frac{996 \cdot 1,5^2}{2} = 31214 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 0,31214 \text{ bar}$$

3.3. Proračun isparivača

Odabran je pločasti potopljeni isparivač s amonijakom i 40%-tnom smjesom vode i propilen glikola. Hladi se 40%-tna smjesa vode i propilen glikola koja se zatim šalje prema potrebi za hlađenje proizvoda. Isparivač ima rashladni učin od 750 kW.



Slika 9. Kompaktni pločasti isparivač

3.3.1. Karakteristične veličine

40%-tna smjesa vode i propilen glikola (sekundar):

- Temperatura smjese vode i propilen glikola na ulazu $\vartheta_{su} = -11\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura smjese vode i propilen glikola na izlazu $\vartheta_{si} = -6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Razlika temperatura smjese ulaz-izlazu $\Delta\vartheta_s = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Specifični toplinski kapacitet pri srednjoj temperaturi $c_s = 3,715\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- Gustoća pri srednjoj temperaturi $\rho_s = 1045,16\text{ kg}/\text{m}^3$

Maseni protok sekundara:

$$q_{ms} = \frac{\Phi_0}{c_s \cdot \Delta\vartheta_s}, \text{ kg/s} \quad (3.3.1.1.)$$

$$q_{ms} = \frac{750000}{3715 \cdot 5} = 40,369 \text{ kg/s}$$

Amonijak R717 (primar):

- Temperatura isparavanja $\vartheta_i = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Entalpija R717 na ulazu u isparivač $h_4 = 278,99\text{ kJ/kg}$
- Entalpija R717 na izlazu iz isparivača $h_1 = 1363,14\text{ kJ/kg}$
- Maseni protok radne tvari $q_{mR717} = 0,692\text{ kg/s}$

Specifični učin isparivača:

$$q_0 = \Delta h_{41} = h_1 - h_4 = 1084,15\text{ kJ/kg} \quad (3.3.1.2.)$$

3.3.2. Svojstva radnih medija

3.3.2.1. 40%-tna smjesa vode i propilen glikola (za srednju temperaturu ulaz-izlaz $\vartheta_{s,sr} = -8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$):

- Specifični toplinski kapacitet $c_s = 3,715\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_s = 21,529 \cdot 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Toplinska provodnost $\lambda_s = 0,38247\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Gustoća $\rho_s = 1045,16\text{ kg/m}^3$
- Prandtllov bezdimenzijski broj $Pr = 209,96$

3.3.2.2. Amonijak (za temperaturu isparavanja $\vartheta_i = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$):

Kapljevina:

- Specifični toplinski kapacitet $c_{fl} = 4,53\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_{fl} = 2,2 \cdot 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Toplinska provodnost $\lambda_{fl} = 0,5455\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Gustoća $\rho_{fl} = 658,6\text{ kg/m}^3$

Para:

- Specifični toplinski kapacitet $c_v = 2,3225\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
- Dinamička viskoznost $\eta_v = 8,969 \cdot 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Toplinska provodnost $\lambda_v = 0,02155\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Gustoća $\rho_v = 1,473\text{ kg/m}^3$

3.3.3. Odabir dimenzija pločastog isparivača

- Visina isparivača $L = 1,1 \text{ m}$
- Širina isparivača $H = 0,8 \text{ m}$
- Kut orebrenja izmjenjivača $\beta = 60^\circ$
- Faktor površine izmjenjivača $\Phi = 1,22$
- Dubina orebrenja (širina kanala) $b = 0,002 \text{ m}$
- Ekvivalentni promjer kanala $d_e = 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$$d_e = 2 \cdot \frac{b}{\Phi}, \text{ m} \quad (3.3.3.1.)$$

$$d_e = 2 \cdot \frac{0,002}{1,22} = 3,279 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

- Broj ploča isparivača $N = 220$
- Površina jednog kanala $A_c = 0,0016 \text{ m}^2$

$$A_c = H \cdot b, \text{ m}^2 \quad (3.3.3.2.)$$

$$A_c = 0,8 \cdot 0,002 = 0,0016 \text{ m}^2$$

3.3.4. Prijelaz topline na strani 40%-tne smjese vode i propilen glikola

Broj kanala za strujanje 40%-tne smjese vode i propilen glikola:

$$N_s = \frac{N}{2} \quad (3.3.4.1.)$$

$$N_s = \frac{220}{2} = 110$$

Brzina strujanja kroz kanal:

$$w_s = \frac{q_{ms}}{A_c \cdot \rho_s \cdot N_s}, \text{ m/s} \quad (3.3.4.2.)$$

$$w_s = \frac{40,369}{0,0016 \cdot 1045,16 \cdot 110} = 0,2194 \text{ m/s}$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj;

$$Re_s = \frac{w_s \cdot d_e \cdot \rho_s}{\eta_s} \quad (3.3.4.3.)$$

$$Re_s = \frac{0,2194 \cdot 0,003279 \cdot 1045,16}{21,529 \cdot 10^{-3}} = 34,936$$

Prandtllov bezdimenzijski broj:

$$Pr = 209,96$$

Nusseltov bezdimenzijski broj se računa prema proračunu Wanniarachchi [ASHRAE

Fundamentals 3. 31, Table 18.]. Vrijedi za:

- $Re = 1 \div 10^4$
- $\Phi = 20^\circ \div 62^\circ$

Faktori potrebni za proračun Nusseltova broja:

$$Nu_l = 3,65 \cdot \beta^{-0,455} \cdot \Phi^{0,661} \cdot Re_s^{0,339} \quad (3.3.4.4.)$$

$$Nu_l = 3,65 \cdot 60^{-0,455} \cdot 1,22^{0,661} \cdot 34,936^{0,339} = 2,155$$

$$m = 0,646 + 0,0011\beta \quad (3.3.4.5.)$$

$$m = 0,646 + 0,0011 \cdot 60 = 0,712$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot \beta^{-1,142} \cdot \Phi^{1-m} \cdot Re_s^m \quad (3.3.4.6.)$$

$$Nu_t = 12,6 \cdot 60^{-1,142} \cdot 1,22^{0,288} \cdot 34,936^{0,712} = 1,561$$

$$Nu_s = (Nu_l^3 + Nu_t^3)^{\frac{1}{3}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3.3.4.7.)$$

$$Nu_s = (2,155^3 + 1,561^3)^{\frac{1}{3}} \cdot 209,96^{\frac{1}{3}} = 14,261$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_s = \frac{Nu_s \cdot \lambda_s}{d_e}, \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.3.4.8.)$$

$$\alpha_s = \frac{14,261 \cdot 0,38247}{3,279 \cdot 10^{-3}} = 1663,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.3.5. Prijelaz topline na strani radne tvari R717:

Dvofazno strujanje u jako tankim cijevima [Lazarek i Black]:

Pretpostavljen toplinski tok je izračunat iterativnim postupkom i iznosi:

$$q_A = 3330 \text{ W/m}^2$$

Srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta\theta_m = \frac{(\theta_i - \theta_{su}) - (\theta_i - \theta_{si})}{\ln \frac{\theta_i - \theta_{su}}{\theta_i - \theta_{si}}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.3.5.1.)$$

$$\Delta\theta_m = \frac{(-15 - (-6)) - (-15 - (-11))}{\ln \frac{-15 - (-6)}{-15 - (-11)}} = 6,166 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Broj kanala za strujanje radne tvari:

$$N_f = \frac{N}{2} - 1 \quad (3.3.5.2.)$$

$$N_f = \frac{220}{2} - 1 = 109$$

Maseni protok po m² poprečnog presjeka:

$$G = \frac{q_{mR717}}{A_c \cdot N_f}, \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2\text{)} \quad (3.3.5.3.)$$

$$G = \frac{0,692}{0,0016 \cdot 109} = 3,968 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

Boilingov bezdimenzijski broj:

$$Bo_A = \frac{q_A}{G \cdot \Delta h_{41}} \quad (3.3.5.4.)$$

$$Bo_A = \frac{3330}{3,968 \cdot 1084150} = 7,74 \cdot 10^{-4}$$

Viskoznost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\eta_x = \eta_{fl} + x(\eta_v - \eta_{fl}), \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (3.3.5.5.)$$

Toplinska provodnost u ovisnosti o sadržaju pare:

$$\lambda_x = \lambda_{fl} + x(\lambda_v - \lambda_{fl}), \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (3.3.5.6.)$$

Reynoldsov bezdimenzijski broj:

$$Re_x = \frac{G \cdot d_e}{\eta_x} \quad (3.3.5.7.)$$

Nusseltov bezdimenzijski broj:

$$Nu_x = 30 \cdot Re_x^{0,875} \cdot Bo_A^{0,714} \quad (3.3.5.8.)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R717:

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_e}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.3.5.9.)$$

Sadržaj pare (kg/kg)	Dinamička viskoznost (Pa·s)	Toplinska provodnost (W/(m·K))	Reynoldsov bezdimenzijski broj	Nusseltov bezdimenzijski broj	Koeficijent prijelaza topline (W/(m ² ·K))
0	0,00022	0,5455	59,134	6,3985	1064,567
0,03	0,00024	0,52978	54,137	5,9228	957,0274
0,06	0,000261	0,51406	49,918	5,5169	865,0008
0,09	0,000281	0,49834	46,31	5,1664	785,2658
0,12	0,000301	0,48263	43,188	4,8603	715,4437
0,15	0,000322	0,46691	40,461	4,5906	653,7389
0,1737	0,000338	0,45449	38538	4,3991	609,8115

Tablica 5. Proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari R717

Srednji koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari R717:

$$\alpha_A = \frac{\sum \alpha_x}{7}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.3.5.10.)$$

$$\alpha_A = \frac{1064,567 + 957,0274 + 865,0008 + 785,2658 + 715,4437 + 653,7389 + 609,8115}{7} = 807,265 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

3.3.6. Provjera pretpostavke za toplinski tok:

- Toplinska provodnost ploče (čelik) $\lambda_{\text{č}} = 50 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- Debljina ploče $\delta = 0,0006 \text{ m}$

Koeficijent prolaza topline:

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{č}}} + \frac{1}{\alpha_A}}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (3.3.6.1.)$$

$$k_A = \frac{1}{\frac{1}{1663,6} + \frac{0,0006}{50} + \frac{1}{807,265}} = 540 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Toplinski tok:

$$q_A = k_A \cdot \Delta \vartheta_m, \text{ W/m}^2 \quad (3.3.6.2.)$$

$$q_A = 540 \cdot 6,166 = 3329,64 \text{ W/m}^2$$

Iteracija je točna jer je toplinski tok približno jednak pretpostavljenom (3330 W/m²).

3.3.7. Potrebna površina za izmjenu topline:

Površina izmjene topline za odabrani izmjenjivač:

$$A_{UK1} = \Phi \cdot L \cdot H \cdot N, \text{ m}^2 \quad (3.3.7.1.)$$

$$A_{UK1} = 1,22 \cdot 1,1 \cdot 0,8 \cdot 220 = 236,192 \text{ m}^2$$

Potrebna površina za izmjenu topline:

$$A_{UK2} = \frac{\Phi_o}{q_A}, \text{ m}^2 \quad (3.3.7.2.)$$

$$A_{UK2} = \frac{750000}{3330} = 225,225 \text{ m}^2$$

Postotak predimenzioniranosti izmjenjivača:

$$\Delta A = \frac{A_{UK1}}{A_{UK2}} \cdot 100 - 100, \% \quad (3.3.7.3.)$$

$$\Delta A = \frac{236,192}{225,225} \cdot 100 - 100 = 4,87 \%$$

Projektirani isparivač je veći za 4,87% od teorijskog potrebnog što je dovoljno dobro i sigurno za korištenje u sustavu.

3.4. Proračun dimenzija cjevovoda

Preporučene brzine strujanja u:

- Tlačni vod $w_t = 20 \text{ m/s}$
- Usisni vod $w_u = 15 \text{ m/s}$
- Kapljevinski vod $w_{kap} = 0,9 \text{ m/s}$

Gustoća radne tvari R717:

- Pregrijane pare u tlačnom vodu $\rho_{sup} = 7,299 \text{ kg/m}^3$
- Suhozasićene pare nakon isparivanja $\rho_1'' = 1,9731 \text{ kg/m}^3$
- Pothlađene kapljevine u kapljevinskom vodu $\rho_3 = 590,26 \text{ kg/m}^3$

3.4.1. Tlačni vod

Volumenski protok:

$$q_{vR717,t} = \frac{q_{mR717}}{\rho_{sup}}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.4.1.1.)$$

$$q_{vR717,t} = \frac{0,692}{7,299} = 0,0948 \text{ m}^3/\text{s}$$

Površina presjeka:

$$A_t = \frac{q_{vR717,t}}{w_t}, \text{ m}^2 \quad (3.4.1.2.)$$

$$A_t = \frac{0,0948}{20} = 0,00474 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot A_t}{\pi}}, \text{ m} \quad (3.4.1.3.)$$

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00474}{\pi}} = 0,07769 \text{ m} = 77,69 \text{ mm}$$

Odabrano:

- Bešavna čelična cijev DN 80 $\Phi 88,9 \times 4 \text{ mm}$

3.4.2. Usisni vod

Volumenski protok:

$$q_{vR717,u} = \frac{q_{mR717}}{\rho_1}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.4.2.1.)$$

$$q_{vR717,u} = \frac{0,692}{1,9731} = 0,001172 \text{ m}^3/\text{s}$$

Površina presjeka:

$$A_u = \frac{q_{vR717,u}}{w_u}, \text{ m}^2 \quad (3.4.2.2.)$$

$$A_u = \frac{0,001172}{15} = 0,02338 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot A_u}{\pi}}, \text{ m} \quad (3.4.2.3.)$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,02338}{\pi}} = 0,17254 \text{ m} = 172,54 \text{ mm}$$

Odabrano:

- Bešavna čelična cijev DN 200 Φ216×10 mm

3.4.3. Kapljevinski vod

Volumenski protok:

$$q_{vR717,kap} = \frac{q_{mR717}}{\rho_3}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.4.2.1.)$$

$$q_{vR717,kap} = \frac{0,692}{590,26} = 0,001303 \text{ m}^3/\text{s}$$

Površina presjeka:

$$A_{kap} = \frac{q_{vR717,kap}}{w_{kap}}, \text{ m}^2 \quad (3.4.2.2.)$$

$$A_{kap} = \frac{0,001303}{0,9} = 0,001303 \text{ m}^2$$

Promjer cijevi:

$$d_{kap} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{kap}}{\pi}}, \text{ m} \quad (3.4.2.3.)$$

$$d_{kap} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001303}{\pi}} = 0,04072 \text{ m} = 40,72 \text{ mm}$$

Odabrano:

- Bešavna čelična cijev DN 40 Φ48,3×2,6 mm

4. SPECIFIKACIJA MATERIJALA I OPREME

4.1. Kompresor

Odabran otvoreni vijčani kompresor za R717.

- Rashladni učin: $\Phi_0 = 71 \text{ kW}$
- Kompresijski omjer: $p_i/p_k = 5,72$
- Snaga: $P = 28,4 \text{ kW}$
- Kao proizvod: Bitzer; tip: OSKA7452-K

kom:3

4.2. Kondenzator hlađen optočnom vodom

Odabran "shell and tube" sa rekuperatorom pregrijanih para za R717.

- Učin kondenzatora $\Phi_k = 960,25 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije $\vartheta_k = 35 \text{ °C}$
- Temperatura pothlađenja $\vartheta_{pot} = 33 \text{ °C}$
- Temperatura pregrijanih para $\vartheta_{sup} = 131,32 \text{ °C}$
- $L \times D = 4,439 \times 0,8 \text{ m}$

Kom: 1

4.3. Isparivač

Odabran kompaktni pločasti isparivač za R717.

- Rashladni učin: $\Phi_0 = 750 \text{ kW}$
- Temperatura isparavanja: $\vartheta_i = -15 \text{ °C}$
- $L \times H = 1,1 \times 0,8 \text{ m}$ sa 220 ploča

Kom: 1

4.4. Rashladni toranj

- Rashladni učin: $\Phi_o = 960,25 \text{ kW}$
- Temperaturni režim optočne vode: $\vartheta_{w1}/\vartheta_{w2} = 26 \text{ °C}/31 \text{ °C}$
- Maseni protok vode: $q_{mw} = 46 \text{ kg/s}$

Kom: 1

4.5. Sakupljač radne tvari

- Volumen: 665 l
- Kao proizvod: Bitzer; tip: F202HA

Kom: 1

4.6. Filtar nečistoća

- Kao proizvod: Danfoss; tip: FIA 50-100

Kom: 3

- Kao proizvod: Danfoss; tip: FIA 80-100

Kom: 3

- Kao proizvod: Danfoss; tip: FIA 20-100

Kom: 1

4.7. Odvajač ulja

- Volumen: 228 l
- Kao proizvod: Bitzer; tip: OA 9011(A)

Kom: 1

4.8. Zaporni ventili

- Kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 20

Kom: 1

- Kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 40

Kom: 3

- Kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 80

Kom: 3

- Kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 200

Kom: 4

- Kao proizvod: Danfoss; tip: SVA 350

Kom: 11

4.9. Elektromagnetski ventili

- Kao proizvod: Danfoss; tip: EVRAT 20

Kom: 4

- Kao proizvod: Danfoss; tip: ICM 25-A

Kom: 5

- Kao proizvod: Danfoss; tip: WVS 100

Kom: 2

4.10. Nepovratni ventili

- Kao proizvod: Danfoss; tip: CHV 20

Kom: 7

- Kao proizvod: Danfoss; tip: CHV 40

Kom: 3

4.11. Presostat niskog tlaka

- Kao proizvod: Danfoss; tip: KP1A

Kom: 1

4.12. Presostat visokog tlaka

- Kao proizvod: Danfoss; tip: KP7ABS

Kom: 1

4.13. Pretvarač tlaka

- Kao proizvod: Danfoss; tip: AKS 32

Kom: 2

4.14. Upravljački sklop

- Kao proizvod: Danfoss; tip: AK PS 730

Kom: 1

4.15. Izolacija

- Kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-140 13 m
- Kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-200 11 m
- Kao proizvod Armaflex; tip: AF-1-350 10 m

4.16. Cijevi

Odabrane čelične cijevi zbog R717.

- DN 10 3 m
- DN 20 5 m
- DN 40 9 m
- DN 80 13 m
- DN 200 11 m
- DN 300 5 m
- DN 350 10 m

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog zadatka bio je projektirati rashladni sustav za potrebe hlađenja tijekom proizvodnje pive (za vrijeme vrenja pive, fermentacije i hlađenja mladog piva). U uvodnom djelu opisana je tehnologija proizvodnje i hlađenja pive po procesima. Nakon toga su prikazani parametri radnih tvari R717 i R290, kojima sustav je može biti punjen. Nakon sigurnosne i energetske analize radnih tvari vidi se da radne tvari imaju svoje prednosti i nedostatke, ali odabrana je radna tvar R717 samo zbog boljih termodinamičkih svojstava. Slijedi proračun komponenti rashladnog sustava: kondenzatora, isparivača i cjevovoda. Navedeni proračuni su provedeni prema *Refrigeration solved examples; Risto Ciconkov*. Na kraju je pridodana još shema spajanja i automatske regulacije, kao i dispozicijski crtež rashladnog agregata.

LITERATURA

- [1] Ljubica Matijašević: *Održive tehnologije u procesima proizvodnje piva*
- [2] *Tehnički propis o racionalnoj uporabi; prilog E*
- [3] Soldo V., Ćurko T.: *Podloge za predavanje Hlađenje i dizalice topline*, Zagreb, 2011.
- [4] ASHRAE, *Systems and Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2000.
- [5] Ciconkov R.: *Refrigeration solved examples*, Skopje, 2001.
- [6] Kraut, B.: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb, 2001.
- [7] Ćurko T.: *Radne tvari u tehnici hlađenja*, Zagreb, 2000.
- [8] Halasz B, Galović A, Boras I.: *Toplinske tablice*, Zagreb, 2007.
- [9] V. Soldo: *Podloge za predavanje Projektiranje rashladnih sustava*

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Shema spajanja i automatske regulacije rashladnog agregata
- III. Dispozicijski crtež rashladnog agregata

